Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 67-82

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۸۲-۶۷

مقاله پژوهشی

تهیه‌ی نقشه‌ی توزیع مکانی فرسایش آبی و رسوب متاثر از الگوریتم‌های مختلف شیب، توسط مدل WaTEM/SEDEM در حوضه‌ی زوجی شوش

حمزه نیسی[1]- عطاله خادم الرسول[2]*- هادی عامری خواه[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷.

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهمترین عوامل تخریب خاک است که ویژگیهای توپوگرافیکی دارای تاثیرات معنی‌داری بر روی چگونگی وقوع و توزیع مکانی آن می‌باشد. در این پژوهش توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در حوضه‌ی آبریز زوجی شوش واقع در استان خوزستان متاثر از الگوریتم‌های مختلف شیب، توسط مدل WaTEM/SEDEM با در نظر گرفتن فرسایندگی باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، پستی و بلندی (LS)، پوشش گیاهی (C) و مدیریت (P) ارزیابی شد. نتایج همبستگی بین پارامترهای ورودی مدل با میزان فرسایش خاک نشان داد که عامل LS دارای بیشترین میزان همبستگی با فرسایش خاک است که بیانگر بیشترین تاثیرگذاری عامل پستی و بلندی بر روی توزیع مکانی فرسایش خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بین مقادیر برآوردی رسوب در شکل‌های مختلف شامل کل رسوبات تولید شده، کل رسوبات ته‌نشین شده و کل رسوبات خروجی از حوضه، بین الگوریتم‌های مختلف شیب شامل گاورز (Govers)، مک‌کوول، نییرینگ و ویشمایر- اسمیت اختلاف وجود دارد. با توجه به مقایسه‌ی مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری شده، الگوریتم نییرینگ نتایجی به مراتب منطبق‌تر با مقادیر اندازه‌گیری شده ارایه داده است. نتایج شبیه‌سازی رابطه‌ی مطلوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده است در نتیجه خروجی‌های مدل WaTEM/SEDEM بر پایه‌ی الگوریتم‌های نییرینگ، امکان شناسایی مکان‌های بحرانی فرسایش و یا تولید رسوب در منطقه را فراهم نموده است، لذا ابزاری کارآمد جهت اتخاذ بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs) موثر برای کنترل مناطق بحرانی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عامل توپوگرافی، شبیه‌سازی، بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs)، فرسایش شیاری و بین‌شیاری، مساحت ویژه‌ی حوزه‌ی آبخیز

مقدمه

با توجه به پیامدها و اثرات سوء ناشی از تخریب و فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز، شناسایی مناطق فرسایشی از اهمیت بسزایی در تدوین برنامه‌ی مدیریت خاک و آب در راستای اهداف توسعه‌ی پایدار برخوردار است و در این ارتباط استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز جهت تخمین و پیش‌بینی فرسایش خاک و پیامدهای ناشی از آن، ابزاری کارآمد به‌حساب می‌آید (۲ و ۴). مدل‌های شبیه‌ساز متعددی وجود دارد که در بین مدل‌های موجود، مدل‌های با پایه‌ی فیزیکی امکان شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی فرسایش خاک و وقوع رواناب را در مناطق فاقد آمار به شکل قابل قبولی فراهم می‌نمایند (۱۲). مدل WaTEM/SEDEM به عنوان یکی از مدل‌های پیش‌بینی توزیع مکانی فرسایش خاک و تعیین نقاط حساس و فرسایش‌زا در حوزه‌ها می‌باشد که از قابلیت برآورد فرسایش آبی و نیز توزیع رسوب برخوردار است (۱۸). مدل WaTEM/SEDEM (Water and tillage erosion model/SEDEM) یک مدل با پایه‌ی زمین‌نما (Landscape-based) است که قادر به تعیین تغییرات زمانی و مکانی فرسایش خاک می‌باشد و از قابلیت ارتباط با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برخوردار است (۲۱ و ۲۳). مدل WaTEM/SEDEM قادر به محاسبه‌ی فرسایش خاک با استفاده از معادله‌ی RUSLE 2D، محاسبه‌ی ظرفیت انتقال رسوبات و همچنین محاسبه‌ی میزان رسوبات ورودی به کانال‌ها می‌باشد (۱۹ و ۲۰). ون رومپی و همکاران (۲۰۰۱) بیان نمودند که مدل WaTEM/SEDEM به عنوان یک ابزار توانمند جهت تعیین جریان رسوبات و تخمین دقیق مقادیر

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، استادیار و مربی، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.khademalrasoul@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2020.14940.0

اندازه‌گیری شده‌ی رسوبات در حوزه‌ها است (۲۱). این مدل برآورد فرسایش آبی، توسط پژوهشگران متعددی در حوضه‌های آبریز اسپانیا (۱) و یا در مقیاس‌های بزرگتر در کشور چین (۹) و به منظور ارزیابی توزیع مکانی فرسایش و رسوب و نیز برآورد تاثیرات برون حوضه‌ای فرسایش خاک استفاده و کارایی آن در تحقق اهداف مذکور تایید شده است.

عامل توپوگرافی یا همان پستی و بلندی تاثیرات قابل توجهی در چگونگی رخدادهای فرسایشی و حمل رسوب دارد. عامل پستی و بلندی با تعیین پارامترهایی مانند شیب و انحناء بر تجمع و سرعت جریانات رواناب اثر گذاشته و بدین واسطه توزیع مکانی فرسایش و رسوب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فرسایش‌های شیاری و بین‌شیاری به‌عنوان دو شکل غالب از فرسایش‌های آبی در حوضه‌های آبریز محسوب می‌شوند که شناسایی و کنترل آنها می‌تواند گامی موثر جهت کاهش باررسوب و لذا کاهش اثرات مخرب فرسایش خاک باشد. با توجه به اینکه عامل پستی و بلندی دارای تاثیرات معنی‌داری بر روی وضعیت توزیع و رخداد فرسایش و رسوب می‌باشد، درنتیجه توجه به این عامل در برآوردهای فرسایش خاک و نیز اتخاذ شیوه‌های مدیریتی و حفاظتی از اهمیت بالایی برخوردار است. در مدل WaTEM/SEDEM عامل توپوگرافی و تاثیرات آن بر روی وضعیت فرسایش در عامل LS و به صورت الگوریتم‌های مختلف در نظر گرفته شده است. مدل WaTEM/SEDEM ترکیبی از مدل‌های WaTEM و SEDEM با هدف ارائه اطلاعات کاربردی برای مدیران زمین و بکارگیری شیوه‌های مدیریتی مناسب در حوضه‌های آبریز می‌باشد (۲۴ و ۲۵). این مدل دارای الگوریتم‌های LS متعددی می‌باشد که امکان شبیه‌سازی مقادیر فرسایش آبی توسط الگوریتم‌های مختلف همچون گاورز، مک‌کول، نیرینگ و ویشمایر–اسمیت را فراهم می‌سازد.

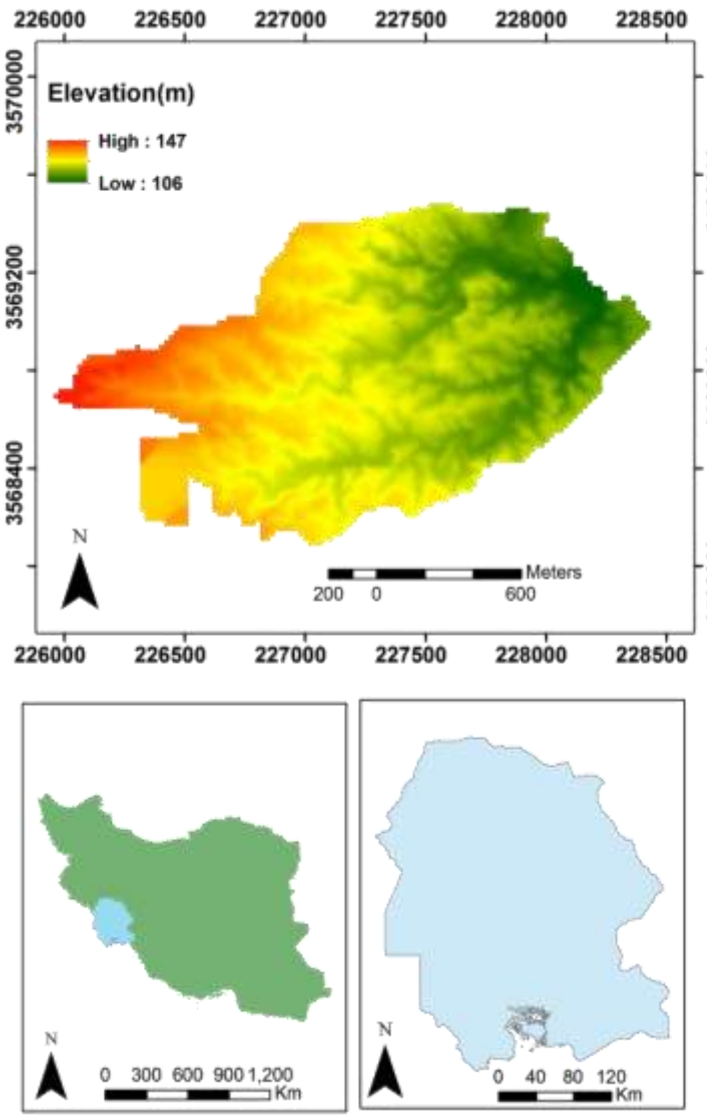
روش استخراج و تهیه‌ی فاکتورهای طول و درجه‌ی شیب نخست به صورت دستی انجام می‌گرفته است (۲۷). در بستر زمان روش‌های متعددی در راستای تعریف و ارزیابی شیب‌های پیچیده در حوضه‌های آبریز گسترش یافته است تا بتوانند عامل توپوگرافی را با دقت در برآوردهای فرسایش و رسوب لحاظ نمایند که در قالب فاکتور LS نامگذاری شده است. به منظور غلبه بر محدودیت‌های مدل‌های مفهومی یک‌بعدی (1-Dimensional) در ارزیابی عامل توپوگرافی، طول شیب توسط عامل مساحت ویژه‌ی حوضه‌ی آبریز (Specific catchment area) جایگزین شده است که این ویژگی امکان تعیین وضعیت شبکه‌ی هیدروگرافی حوضه و ویژگیهای جهت جریان و تجمع جریان را فراهم نموده و در نتیجه دید کاملتری از وضعیت جریان‌های سطحی یا رواناب در حوضه در اختیار ما قرار می‌دهد. در این حالت اطلاعات مربوط به توپوگرافی به شکل دقیقی از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استخراج می‌شود. بدین ترتیب فاکتور LS محاسبه شده برمبنای شبکه‌ی سلولی است که نشان دهنده اجزاء دامنه‌ی شیب بر اساس سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌باشد. همچنین فو و همکاران (۶) این رویکرد مساحت ویژه‌ی حوضه را در استفاده از مدل RUSLE برای محاسبه‌ی نسبت تحویل رسوب (Sediment delivery ratio) جهت ارزیابی تاثیرات بدون خاکورزی بر روی فرسایش و باررسوب لحاظ نمودند. به هر حال قابلیت‌ها و ظرفیت‌های این رویکرد سبب شده است که توسط پژوهشگران متعددی مورد استفاده قرار گیرد زیرا تاثیرات عامل توپوگرافی را به نحو واقعی‌تری لحاظ می‌نماید. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، با مقادیر واقعی اندازه گیری شده، مقایسه نشده است (۲۸). لذا در پژوهش حاضر نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل با رویکرد فوق‌الذکر، با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در حوضه مقایسه گردیده است.

در این بررسی سعی شده است تا ضمن برآورد مکانی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل WaTEM/SEDEM، کارایی این مدل سنجیده شده و الگوریتم‌های مختلف تهیه یا محاسبه‌ی LS موجود در مدل برای برآورد فرسایش و توزیع رسوب مورد ارزیابی قرار گیرند. ارزیابی این الگوریتم‌ها کمک می‌کند تا در انتخاب الگوریتم مناسب برای برآورد فرسایش و رسوب دقت لازم صورت پذیرد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تا حد امکان به واقعیت نزدیک شود.

مواد و روش ها

معرفی و موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی

منطقه‌ی مطالعاتی حوضه‌ی آبریز زوجی شوش واقع در موقعیت جغرافیایی ۱۳َ ۳۲ْ ۳۲ تا ۳۲ً ۱۴َ ۳۲ْ شمالی و ۲۷ً ۰۵َ ۴۸ْ تا ۳۳ً ۰۹َ ۴۸ْ شرقی می‌باشد (شکل ۱). محدوده‌ی مطالعاتی در این پژوهش دارای مساحت تقریبی ۲۰۰ هکتار است. میانگین سالانه‌ی درجه حرارت حوضه‌ی مطالعاتی ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد، رژیم رطوبتی منطقه Aridic (خشک) و رژیم حرارتی آن هایپرترمیک می‌باشد. با توجه به ویژگیهای زمین‌شناسی و نیز نهشته‌های برجای مانده، منطقه‌ی مطالعاتی از حالت تپه ماهوری برخوردار است و بافت خاک‌های منطقه به طور غالب بافت لومی (L) است. همچنین تغییرات ارتفاعی منطقه‌ی مورد مطالعه بین ۱۰۶ تا ۱۴۷ متر متغیر می‌باشد که در مدل رقومی ارتفاع منطقه نمایش داده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی در قالب مدل رقومی ارتفاع (DEM)
Figure 1- The location of study area based on the digital elevation model

پایش‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی

این پژوهش مشتمل بر دو بخش کلی است، بخش اول مربوط به مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی است که در این ارتباط مقادیر فرسایش خاک و باررسوب تولیدی در حوضه‌ی مطالعاتی توسط روش میخکوبی (Erosion Pin) و پلات‌های فرسایشی (Erosional plots) اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه به‌عنوان یک حوضه‌ی تیپیک در استان خوزستان و زیر نظر اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان به صورت اصولی و کارشناسانه مدیریت شده و اندازه‌گیری‌های میدانی به صورت مستمر انجام می‌شود. بدین ترتیب اندازه‌گیری فرسایش خاک شامل فرسایش‌های صفحه‌ای، شیاری، خندقی و کناررودخانه‌ای با استفاده از میخکوبی و پلاتهای فرسایشی اندازه‌گیری شد. همچنین با بهره‌گیری از دو ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی در محدوده‌ی مطالعاتی، اندازه‌گیری تغییرات باررسوب در یک دوره‌ی زمانی ۱۵ ساله از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷ صورت گرفت. لازم به ذکر است که در حوضه‌ی مطالعاتی اختلاف ارتفاع کمی وجود دارد که این امر منجر به کاهش تفاوت در ویژگی‌های خاک منطقه‌ی مطالعاتی شده است و تقریبا خاک از شرایط همگنی برخوردار است. بدین ترتیب اندازه‌گیری ویژگیهای خاک جهت محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K-Factor) با استفاده از ۸ نقطه در سطح حوضه صورت پذیرفت که انتخاب این نواحی به گونه‌ای انجام شده است که نماینده‌ی خاک کل منطقه باشد. علیرغم وجود اختلاف ارتفاع کم در منطقه و همگن

بودن خصوصیات خاک، جهت افزایش میزان دقت در مطالعات منطقه و انجام اقدامات حفاظتی بر اساس شرایط حاکم، در نتیجه حوضه‌ی مطالعاتی به تعداد ۶۷ زیرحوضه دسته‌بندی شد که این زیرحوضه‌ها مشتمل بر دو دسته‌ی دارای مدیریت و فاقد مدیریت (شاهد) می‌باشند. همچنین با توجه به مقادیر عامل مدیریت وارد شده (P) داده‌های ۲۰ زیرحوضه فاقد مدیریت جهت بررسی کارایی مدل در بخش شبیه‌سازی پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. عامل تاثیرگذار دیگر خصوصیات خاک منطقه و وضعیت پوشش گیاهی موجود است که همانگونه که اشاره شد با توجه به همگن بودن خاک منطقه (وجود اختلافات حداقلی) در نتیجه با برداشت نمونه‌های خاک از ۸ نقطه در سطح منطقه‌ی مطالعاتی و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، آنالیز نمونه‌ها صورت پذیرفت. برای هر نمونه‌ی خاک بافت خاک، درصد ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد سنگریزه با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. مضافا بر موارد فوق‌الذکر داده‌های اقلیمی حوضه‌ی مطالعاتی به صورت دقیق و برداشت‌های صورت گرفته از ایستگاه هواشناسی موجود در حوضه‌ی مطالعاتی، تهیه شد. مهمترین داده‌های آب و هوایی شامل درجه حرارت، میانگین بارندگی، جهت و سرعت وزش باد است. بدین ترتیب از طریق یک ایستگاه کلیماتولوژیک مجهز به بادسنج، بادنما، تبخیرسنج و دماسنج‌های دقیق آمار و اطلاعات هواشناسی حوضه‌ی مطالعاتی برای دوره‌ی زمانی ۱۵ ساله استخراج شد. همچنین با استفاده از ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی، باررسوب نیز اندازه‌گیری شد. در مجموع با استفاده از امکانات فنی موجود در حوضه خصوصیات اقلیمی، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و مدیریت پایش و اندازه‌گیری شد.

شبیه‌سازی با استفاده از مدل WaTEM/SEDEM

بخش دیگر این پژوهش شبیه‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب توسط مدل فرسایشی WaTEM/SEDEM است. این مدل یک مدل با پایه‌ی زمین‌نما است که مبنای اصلی آن پارامترهای معادله‌ی جهانی فرسایش خاک می‌باشد؛ با این تفاوت که محاسبات را بصورت دو بعدی (2D) انجام می‌دهد (۲۰ و ۲۱) و علاوه بر فرسایش خاک، وضعیت حمل و توزیع رسوب را نیز در سطح حوضه‌ی آبریز مشخص می‌نماید. معادله‌ی جهانی فرسایش خاک بصورت رابطه‌ی (۱) ارائه می‌گردد (۱۳)، که شامل ۶ عامل موثر بر فرسایش است.

$$A = R * K * L * S * C * P \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، A: مقدار خاک فرسایش یافته حاصل از فرسایش ورقه‌ای و شیاری بر حسب کیلوگرم در مترمربع در سال ($kg.m^{-2}.year^{-1}$)، R: عامل بارندگی است که قدرت فرسایندگی را نشان می‌دهد ($Mj.mm.m^{-2}.h^{-1}.year^{-1}$)، K: ضریب فرسایش‌پذیری خاک است که مقاومت خاک در برابر عوامل فرساینده را نشان می‌دهد ($kg.h.mm^{-1}$). عوامل مدیریت شامل پارامترهای C و P هستند که به‌ترتیب نشان دهنده‌ی پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشند.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب توسط مدل WaTEM/SEDEM ورودی‌های مدل در قالب عوامل تاثیرگذار بر فرسایش خاک شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه، نقشه‌ی پارسل‌بندی حوضه، وضعیت ارتباط بین پارسل‌ها[1] و شبکه‌ی آبراهه‌ای تعریف شدند. سپس عامل فرسایش‌پذیری خاک (K-Factor) و عامل پوشش گیاهی (C-Factor) به‌صورت نقشه‌های GISای رستری با اندازه‌ی سلول ۲۰×۲۰ متر و فرمت IDRISI با استفاده از ماژول‌های موجود در نرم‌افزارهای ArcGIS و Whitebox تولید شده و در فرایند شبیه‌سازی در اختیار مدل قرار گرفتند. لازم به ذکر است که فرمت ورودی‌های مدل WaTEM/SEDEM به‌صورت IDRISI raster و با اندازه‌ی سلول‌های ۲۰×۲۰ متر می‌باشد تا امکان اجرای مدل فراهم گردد.

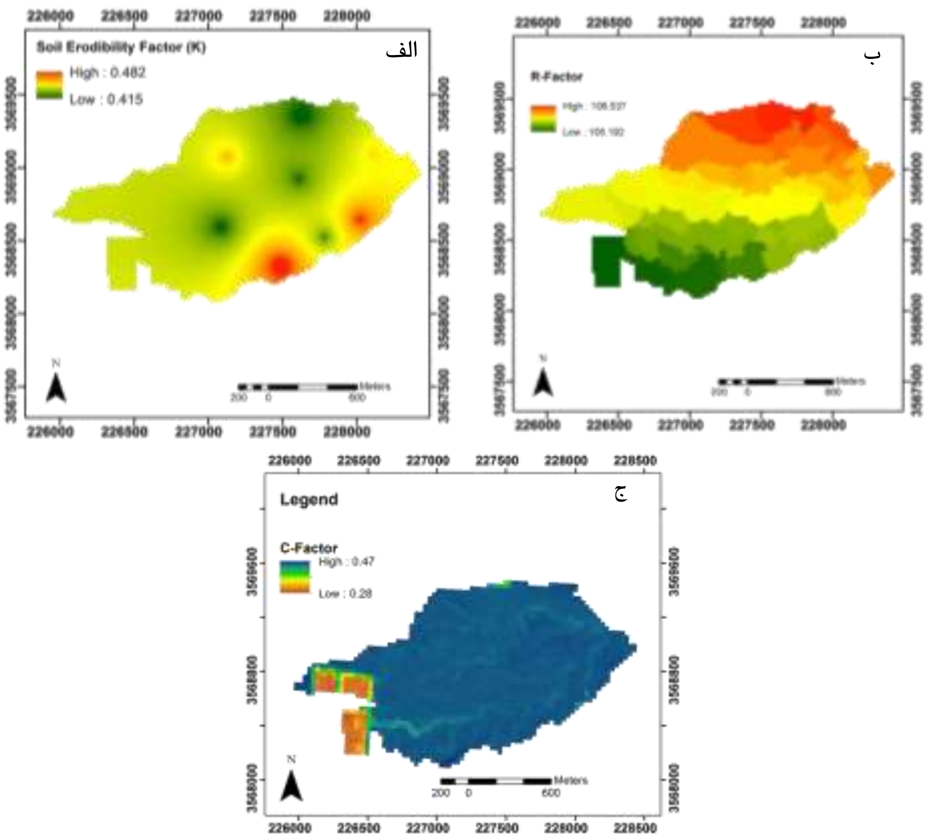
عامل C به‌عنوان پوشش گیاهی است که از جمله عوامل بسیار مهم و تاثیرگذار بر روی رخدادهای فرسایشی و کنترل فرسایش است. عامل C فاکتوری بدون بعد است، مقدار عددی آن بین ۰ و ۱ متغیر بوده و مقادیر آن برای زمین‌های کشاورزی (Farmland)، جنگلی (Forest) و مرتع (Rangeland) متفاوت می‌باشد (شکل ۲ج). محاسبه‌ی عامل C در این پژوهش با استفاده از روش رضایی و همکاران (۱۳۹۳) انجام شده است که در این روش عامل C به صورت تابعی از شاخص NDVI می‌باشد (C= ((1-NDVI)/2) (۱۵). مقادیر فاکتور پوشش گیاهی (C) برای پوشش‌های گیاهی متراکم نظیر علفزارها و جنگل ها مقدار آن صفر در حالیکه برای اراضی فاقد پوشش گیاهی برابر ۱ می باشد لذا از پتانسیل فرسایش پذیری بالایی برخوردارند (۲۷).

عامل K بیانگر فرسایش‌پذیری خاک است که عمدتا از بافت و ساختمان خاک تاثیر می‌پذیرد. برای تعیین عامل فرسایش پذیری (K) نمونه‌های خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری تهیه و درصد ذرات رس با قطر کمتر از ۰/۰۰۲> میلی متر، ذرات سیلت با قطر (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲ میلی متری) و درصد شن (۲ تا ۰/۰۵ میلی متر) با استفاده از روش هیدرومتری (۳) اندازه گیری شد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۲ و ۳ (۱۴ و ۱۷) که در واقع دربرگیرنده‌ی تمامی عوامل موجود در روش ویشمایر-اسمیت می‌باشد مقدار عامل فرسایش پذیری خاک محاسبه شد (۱۳).

$$K = 7.594 \left\{0.0017 + 0.0494 exp\left[-0.5\left(\frac{log(Dg) + 1.675}{0.6986}\right)^2\right]\right\} \qquad (۲)$$

$$D_g = \exp\left(0.01 \sum fiLn(mi)\right) \qquad (۳)$$

1- Parcel connectivity



شکل ۲- نقشه توزیع مکانی فاکتور فرسایش پذیری خاک (الف) نقشه توزیع مکانی عامل فرسایندگی باران (ب) و نقشه عامل پوشش گیاهی (ج)
Figure 2- The map of soil erodibility (a) Rainfall erosivity (b) and (c) C-Factor

که در آن K عامل فرسایش‌پذیری خاک، Dg: میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی‌متر، fi: اندازه ذرات خاک بر حسب درصد و mi: میانگین حسابی ذرات بر حسب میلی‌متر می‌باشد. با به دست آوردن مقادیر عامل فرسایش‌پذیری (K-Factor) با استفاده از روش IDW[1]، نقشه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک تهیه گردید (شکل ۲ الف).

الگوریتم‌های LS به‌عنوان یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر روی مقدار و توزیع مکانی فرسایش و رسوب در سطح حوضه‌ی آبریز است که شامل الگوریتم‌های ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) (۲۷)، مک‌کول (۱۹۸۷، ۱۹۸۹) (۱۰)، گاورز (۱۹۹۱) (۸) و نیرینگ (۱۹۹۷) (۱۱) می‌باشند (۱). وجود این الگوریتم‌ها امکان تعریف و شبیه‌سازی عامل پستی و بلندی را بالاخص بر روی توزیع فرسایش‌های شیاری و بین شیاری در حوزه‌ها فراهم می‌سازد.

همچنین عامل فرسایندگی باران (R-Factor) که شاخصی از انرژی باران در جداسازی و انتقال ذرات خاک است با استفاده از روابط (۴)، (۵) و (۶) محاسبه گردید.

$$R = (0.07397 \times MFI^{1.847}) \quad (۴)$$

$$MFI = \sum(\frac{Pi^2}{p}) \quad (۵)$$

$$P = 0.02764H + 0.00201X + 0.00224Y) - 7995.69 \quad (۶)$$

در رابطه‌ی بالا، H: ارتفاع ایستگاه (متر)، X: طول جغرافیایی، Y: عرض جغرافیایی، P: متوسط بارندگی سالانه (میلی متر) و Pi: متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه iام. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های منطقه در محدوده‌ی مطالعاتی، داده‌های بارش از ۱۲ ایستگاه اطراف حوضه‌ی زوجی جمع‌آوری گردید و عامل فرسایندگی باران محاسبه شد (شکل ۲ب) که در این شکل توزیع مکانی عامل فرسایندگی باران نمایش داده شده است.

پس از تهیه‌ی تمامی ورودی‌های مدل و تعریف الگوریتم‌های LS و نیز مقدار جرم مخصوص ظاهری متوسط خاک با مقدار عددی ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدل WaTEM/SEDEM اجراء شد و خروجی‌های مدل استحصال گردید. استخراج پارامتر LS مسئله‌ای

1- Inverse distance weighting (IDW)

کلیدی در استفاده از مدل USLE می باشد. این بدین واسطه است که عامل LS حساس‌ترین پارامتر مدل USLE جهت برآورد هدررفت خاک می‌باشد (۲). برای استفاده از رویکرد مبتنی بر استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی جهت محاسبات شاخص LS مدل رقومی ارتفاع به‌شکل شبکه‌ی ۵ متری تهیه شده از برداشت‌های زمینی و نقشه‌ی هیپسومتری با مقیاس ۱:۸۰۰۰، مورد استفاده قرار گرفت. در محاسبات مربوط به شاخص LS پارامترهای جهت جریان، تجمع جریان، درجه‌ی شیب و مساحت ویژه‌ی حوضه در محیط ArcMap محاسبه گردید. نقشه‌هایی که به عنوان ورودی مدل WaTEM/SEDEM مورد استفاده قرار گرفتند از طریق زیرروال Resample به رسترهای در وضوح (رزولوشن) ۲۰ متر تبدیل شدند. شاخص LS در این بررسی با چهار روش مختلف محاسبه شد. در این محاسبات λ نشان دهنده طول شیب و β نشان دهنده درجه‌ی شیب براساس رادیان می‌باشد. این روش‌ها عبارتند از الف- یک روش مبتنی بر رابطه (1978) Wischmeier-Smith (۲۷) که در این معادله (رابطه‌ی (۷)) شاخص L مبتنی بر معادله توانی طول شیب با رده‌بندی توان بر اساس درجه شیب و شاخص S بر مبنای رگرسیون خطی توان ۲ سینوس درجه شیب محاسبه شد.

(۷)

$$LS = (65.4\sin^2\beta + 4.5\sin\beta + 0.0654)(\frac{\lambda}{22.13})^m \times$$

$$m = 0.5 \text{ if } \beta > 0.05$$
$$m = 0.4 \text{ if } 0.03 < \beta > 0.05$$
$$m = 0.3 \text{ if } 0.01 < \beta > 0.03$$
$$m = 0.2 \text{ if } \beta < 0.01$$

همانگونه که قبلا نیز بیان شد در محاسبات صورت گرفته در نرم‌افزار ArcMap مساحت ویژه‌ی حوضه جایگزین طول شیب گردید. ب- یک روش مبتنی بر رابطه‌ی McCool (1989) است (۱۰) در این روش نیز همانند رابطه‌ی(1978) Wischmeier-Smith شاخص L مبتنی بر معادله‌ی توانی طول شیب محاسبه می‌گردد لیکن ضریب توان طول شیب از طریق محاسبه‌ی نسبت جزء F صورت می‌گیرد (رابطه‌ی ۸) که در مناطقی که طول شیب کمتر از ۴/۵ متر باشد با در نظر گرفتن مقدار F برابر صفر عملا عامل L برابر یک و بدون تاثیر و فرسایش صرفا تابع درجه شیب خواهد بود. در این روش شاخص S بر مبنای رگرسیون خطی درجه یک سینوس درجه‌ی شیب محاسبه می‌گردد و شیب ها نسبت به روش پیشین به صورت ساده‌تری وارد معادلات می‌نماید.

(۸)

$$LS = (\frac{\lambda}{22.13})^m \times \begin{cases} (10.8\sin\beta + 0.03) & \text{if } \beta < 0.09 \\ (16.8\sin\beta - 0.5) & \text{if } \beta \geq 0.09 \\ (3\sin 0.8\beta + 0.56) & \text{if } \lambda\, 4.5\text{ m} \end{cases}$$

$$m = F/(1+F)$$

که

$$F = \frac{\sin\beta/0.0896}{\sin^{0.8}\beta + 0.56}$$

$$F = 0 \text{ when there is deposition if } \lambda \leq 4.5\text{ m}$$

ج- یک روش مبتنی بر رابطه‌ی (1997) Nearing که در این روش شاخص S بر پایه معکوس معادله نمایی درجه شیب شاخص را محاسبه می‌کند (رابطه‌ی ۹). در این روش بر خلاف دو روش قبل اثرگذاری درجه‌ی شیب بر روی فرسایش نه به صورت معادله خطی یا توانی بلکه بر مبنای رابطه‌ای نمایی در نظر گرفته می‌شود.

$$LS = (\frac{\lambda}{22.13})^m \times (-1.5 + \frac{17}{(1+e^{(2.3-6.1\sin\beta)})}) \qquad (۹)$$

د- و در نهایت محاسبه‌ی شاخص LS بر مبنای رابطه‌ی (1991) Govers می‌باشد که در این رابطه شاخص LS بر مبنای شاخصی ساده از تغییرات ارتفاع در برابر تغییرات مکان محاسبه می‌گردد (رابطه‌ی ۱۰).

$$LS = (\frac{\lambda}{22.13})^m \times (\tan\beta/0.09) \times 1.45 \qquad (۱۰)$$

نتایج و بحث

ویژگی‌های جریان آب و شبکه هیدروگرافی

متاثر از تغییرات ارتفاعی منطقه‌ی مطالعاتی و ویژگی‌های شیب منطقه، چگونگی توزیع آب در منطقه متفاوت می‌باشد. نتایج نشان داد عامل پستی و بلندی بر روی این الگوهای جریانی (شکل ۳) و در نتیجه شدت و توزیع مکانی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه‌ی مطالعاتی تاثیرگذار است. همانگونه که شکل ۳الف نشان می‌دهد وضعیت آبراهه‌ها یا همان شبکه‌ی هیدروگرافی در سطح حوضه‌ی مطالعاتی متفاوت می‌باشد و از آبراهه‌های با ابعاد مختلف تشکیل شده است. تقابل پیچیدگی شبکه‌ی هیدروگرافی با ویژگی‌های توپوگرافی، منجر به ایجاد الگوهای جریانی متفاوتی شده است. همچنین در این ارتباط شاخص تمرکز جریان[1] که نقشه‌ی آن نمایش داده شده است (شکل ۳ب) به عنوان یکی از شاخص‌هایی است که چگونگی توزیع جریان و نیز نواحی با تمرکز بالای جریان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۳ب نمایش می‌دهد شاخص تمرکز جریان در منطقه‌ی مطالعاتی بین ۰ تا ۶۴۵۲ متغیر است و این اعداد بیانگر تعداد پیکسل‌هایی است که جریان آبی آنها به آن پیکسل (Pixel) وارد می‌شود. عدد صفر (۰) یعنی از هیچ پیکسل کناری جریان تحویل نمی‌گیرد و ۱۰۰ یعنی جریان ایجاد شده‌ی ۱۰۰ پیکسل به آن پیکسل می‌ریزند. در نتیجه با افزایش این عدد مقدار آب تخلیه شده و جاری در آن پیکسل بیشتر شده که ماحصل آن تشدید جریان‌های متمرکز

1- Flow accumulation (FA)

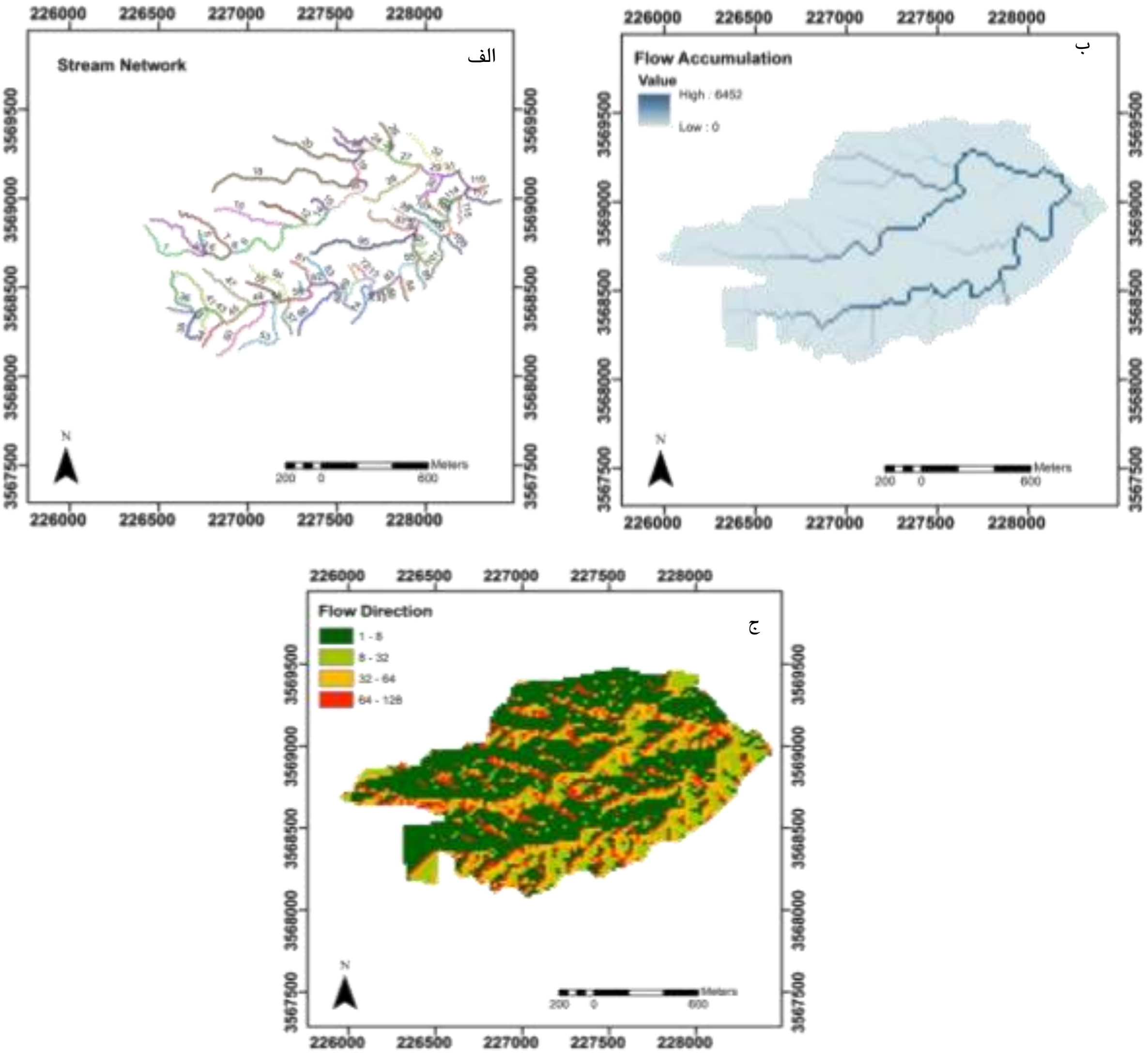
آبی و خطرات فرسایشی است. این خطوط آبی پررنگ که به عنوان مسیر اصلی جریان‌های متمرکز هستند دارای بیشترین میزان رخداد فرسایش آبی می‌باشند. علاوه بر تمرکز جریان، شاخص جهت جریان[1] از دیگر شاخص‌های جریان آب می‌باشد (شکل ۳ج). نقشه‌ی کلاس‌بندی جهت جریان در حوضه‌ی مطالعاتی نشان می‌دهد که ۴ کلاس جهت جریان شامل ۸-۱، ۳۲-۸، ۶۴-۳۲ و ۱۲۸-۶۴ وجود دارد که نشان دهنده‌ی سمت و سوی جریان آب در منطقه است. بدین صورت است که ۱ بیانگر حرکت آب به شرق، ۲ یعنی حرکت آب به سمت جنوب شرق، ۴ یعنی جریان به سمت جنوب، ۸ نشان دهنده‌ی جریان به سمت جنوب غرب، ۱۶ یعنی جریان به سمت غرب، ۳۲ به سمت شمال غرب، ۶۴ بیانگر جریان به سمت شمال و ۱۲۸ نشان دهنده‌ی جریان به سمت شمال شرق است. بدین ترتیب نقشه‌های تجمع و جهت جریان به خوبی نشان می‌دهد که دو جریان اصلی در حوضه وجود دارد که آب را به سمت شرق حوضه هدایت و تخلیه می‌نمایند. نظریه‌های شبکه‌ها برای نمایش و پردازش ساختار تعداد قابل توجه‌ای از سیستم‌های زیستی منجمله شبکه‌ی جریان و رودخانه استفاده شده‌اند. سنجش درجه‌ی تکامل حوضه‌ی آبریز و شبکه رودخانه‌های آن با معیارهایی نظیر تراکم، رتبه یا رده و نسبت انشعابات جریان صورت می‌پذیرد. تراکم شبکه‌ی رودخانه معیاری است که معمولا طول رودخانه‌ها را مشخص می‌کند ولیکن وضعیت شبکه‌بندی و اتصال شاخه‌های مختلف جریان را نمایان نمی‌سازد. برای اطلاع از نحوه‌ی ارتباط انشعابات مختلف از رده‌بندی آبراهه‌ها استفاده می‌شود. این موضوع با توجه به کاربردهای آنها، به روش‌های مختلفی انجام می‌شود، اما هدف مشترک این روش‌ها رده‌بندی آبراهه‌ها است که بر اساس ارتباط مکانی و توپولوژی آن‌ها صورت می‌گیرد. در این روش‌ها، جهت جریان آب از اهمیت بالایی برخوردار است و هرکدام از این روش‌ها با فرض مشخص‌بودن جهت جریان آب، قابل پیاده‌سازی می‌باشد. در این بررسی از روش شرو (Sherve) استفاده شده است. در روش شرو سرشاخه‌ها رتبه یک دارند. از اتصال دو آبراهه‌ی رتبه یک، رودخانه درجه ۲ به‌وجود می‌آید. در این روش بیشترین عدد، خط جریان خروجی را مشخص می‌نماید. در شکل ۳ الف رده‌بندی شبکه آبراهه‌ای منطقه بر پایه روش شرو آورده شده است. انطباق داده‌های شکل ۳ الف با داده‌های مندرج در شکل‌های ۳ ب و ۳ ج، وضعیت شبکه‌ی آبراهه‌ای منطقه را کاملا مشخص می‌سازد. دو شبکه‌ی جریان تقریبا افقی غرب به شرق در قسمت بالایی و پایین منطقه وجود دارد که تقریبا هموزن بوده و رواناب را از تمام حوضه به محل تلاقی خود و خروجی حوضه در منتهاالیه شرق منطقه می‌رسانند. تهیه‌ی این نقشه‌ها، ابزاری کارآمد جهت ارزیابی وضعیت جریان آب در حوضه و درنتیجه تعیین نواحی با خطر بالای فرسایش است. با توجه به اینکه جریان‌های آبی از اجزاء مختلفی تشکیل شده‌اند، لذا در اختیار داشتن تمامی این مولفه‌ها یا پارامترها می‌تواند در ارزیابی هر چه بهتر و دقیق‌تر فرسایش خاک موثر باشد (۲۲).

شاخص‌های تمرکز جریان و جهت جریان در شناسایی الگوهای جریان آبی در حوضه‌ی مطالعاتی و یافتن مکان‌هایی که از شرایط بحرانی‌تری جهت رخدادهای فرسایشی برخوردارانـد، کاربرد فراوانی دارند. عامل شیب با برخورداری از اجزاء مختلف بر میزان فرسایش‌پذیری منطقه تاثیرگذار است. ویلسون و گالانت نیز با انجام پژوهش‌هایی در این ارتباط، تاثیرات معنی‌دار شاخص‌های جریان را بر روی پتانسیل فرسایش‌پذیری ناشی از جریان‌های متمرکز آبی، تایید نموده‌اند (۲۶). در مقوله‌ی فرسایش‌های آبی آرایش و تمرکز الگوهای جریان آبی عاملی تعیین کننده در کندن و جابجایی ذرات و توده‌های خاک می‌باشد (۱۶). وجود جریان‌های متمرکز آبی می‌تواند سرعت آستانه‌ی فرسایش آبی را کاهش دهد. علاوه بر شاخص‌های جریانی، ویژگیهای توپوگرافی و الگوهای پستی و بلندی منطقه می‌توانند تعیین کننده‌ی وضعیت رخدادهای فرسایشی و رسوبگذاری باشند.

شاخص‌های توپوگرافیکی، الگوریتم‌های LS و توزیع مکانی فرسایش و رسوب

مدل WaTEM/SEDEM به‌عنوان یک مدل با پایه‌ی زمین‌نما محسوب می‌شود که با بهره‌مندی از الگوریتم‌های مختلف شیب، امکان شبیه‌سازی عامل توپوگرافی را در رخدادهای فرسایش خاک فراهم می‌نماید (۱۸). نتایج اندازه‌گیری‌های شیب بر حسب درجه (Slope degree) در منطقه‌ی مطالعاتی نشان می‌دهد که تغییرات شیب در حوضه‌ی زوجی شوش در ۴ کلاس بین ۰ تا ۱۰ درجه (معادل ۰ تا ۱۸/۸ درصد) قرار دارد (شکل ۴ الف). یعنی منطقه‌ی مطالعاتی مشتمل بر مناطق کاملا هموار با شیب تقریبا ۰ تا مناطق شیبدار یعنی حداکثر شیب ۱۰ درجه‌ای است. شایان ذکر است که علیرغم پایین بودن دامنه‌ی تغییرات شیب در منطقه‌ی مطالعاتی، ولیکن از تاثیرگذاری بالایی بر روی تغییرات فرسایش‌پذیری خاک برخوردار است (۱۳). متاثر از تفاوت در درجه‌ی شیب، مقادیر فرسایش خاک و رسوبگذاری در بخش‌های مختلف حوزه با هم متفاوت می‌باشد. همانگونه که شکل ۴ الف نشان می‌دهد نواحی قرمز رنگ در نقشه، مناطق دارای بیشترین درجه‌ی شیب (بین ۸ تا ۱۰ درجه) می‌باشند که منطبق با ویژگی‌های جریانی فوق‌الذکر هستند. بدین معنی که در این مناطق حداکثر جریان متمرکز رخ می‌دهد که نتیجه‌ی آن بیشترین میزان فرسایش خاک است. مناطقی که در نقشه به رنگ سبز پررنگ هستند دارای دامنه‌ی شیب بین ۰ تا ۲ درجه می‌باشند که به عنوان مناطق هموار (Flat) محسوب می‌شوند.

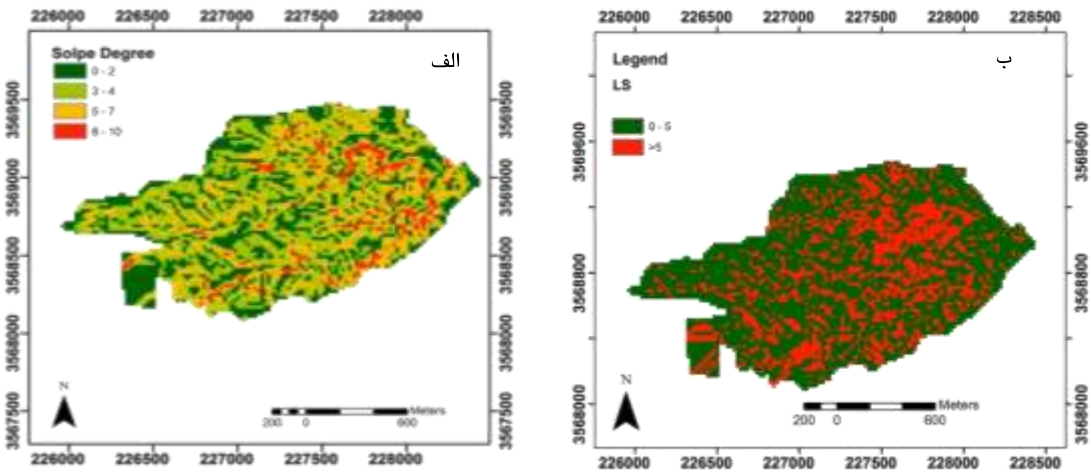
1- Flow direction (FD)



شکل ۳- نقشه‌ی شبکه‌ی آبراهه‌ای (stream network) (الف)، نقشه‌ی توزیع مکانی تمرکز جریان (FA) (ب) و نقشه‌ی توزیع مکانی جهت جریان (FD) (ج) در منطقه‌ی مطالعاتی

Figure 3- The map of stream network (a) flow accumulation (FA) (b) and flow direction (FD) (c) in the study area

با توجه به اینکه تاثیر عامل شیب در مدل فرسایشی WaTEM/SEDEM توسط عامل LS بیان می‌گردد که دربرگیرنده‌ی عامل طول شیب نیز می باشد، درنتیجه نقشه‌ی عامل LS (شکل ۴ب) که به صورت اتوماتیک و بر اساس DEM منطقه توسط خود مدل WaTEM/SEDEM تولید می‌شود، نیز ارزیابی گردید. عامل LS منطقه‌ی مطالعاتی شامل ۲ کلاس یعنی ۰ تا ۵ و بیشتر از ۵ می‌باشد که حد بالای آن به رنگ قرمز مشاهده می‌گردد و بیانگر مناطق بحرانی از لحاظ وقوع فرسایش است (شکل ۴ب). عامل LS از نقش بسیار مهم و کلیدی در کیفیت خروجی‌های مدل برخوردار است زیرا مدل در شبیه‌سازی‌هایی که انجام می‌دهد، عامل LS را از DEM منطقه استخراج می‌نماید (۲۰). عامل LS در مدل WaTEM/SEDEM شامل چندین الگوریتم است که با توجه به وجود تفاوت در مبانی محاسباتی این الگوریتم‌ها و نیز نوع و نسبت فرسایش‌هایی که شبیه‌سازی می‌نمایند، مقادیر فرسایش برآوردی از این الگوریتم‌ها با هم متفاوت است (۱۸). نتایج شبیه‌سازی با مدل WaTEM/SEDEM اطلاعاتی در ارتباط با میانگین فرسایش خاک، رسوبات تولید شده، رسوبات ته‌نشین شده در سطح حوضه و برکه‌ها و رسوبات خروجی از آبراهه‌ها ارائه داده است (جدول ۲).



شکل ۴- نقشه‌ی توزیع مکانی درجه شیب (الف) و نقشه‌ی توزیع مکانی عامل LS (ب) در منطقه مطالعاتی

Figure 4- The spatial map of slope degree (a) and LS factor (b) in the study area

جدول ۱- ضریب همبستگی و معادلات رگرسیونی فاکتورهای مدل با میزان فرسایش خاک

Table 1-The correlation coefficient and regression equations of model with soil erosion

فاکتورهای مدل WaTEM/SEDEM (WaTEM/SEDEM model factors)	معادله‌ی رگرسیونی (Regression equation)	ضریب همبستگی (R)
K	Y=0.1119X+47	0.36
R	Y=0.4627X+104.93	0.44
LS	Y=0.1119X0.7325	0.78
P	Y=5.281X+2.5881	0.20
C	Y=0.0034X+0.2528	0.75

همچنین نتایج همبستگی بین عوامل شش‌گانه موثر بر میزان فرسایش خاک موجود در مدل WaTEM/SEDEM نشان می‌دهد که عامل توپوگرافی (LS-Factor) دارای بیشترین تاثیر بر روی مقدار فرسایش خاک است. عامل توپوگرافی با بالاترین ضریب همبستگی (۰/۷۸) موثرترین عامل در برآورد فرسایش سالانه بوده است و بیانگر بیشترین میزان تاثیرگذاری بر مقدار و توزیع فرسایش خاک و رسوب در حوضه است. عوامل پوشش گیاهی، بارندگی و فرسایش‌پذیری خاک به ترتیب در اولویت‌های دوم تا چهارم قرار دارند (جدول ۱). در این ارتباط رنارد و همکاران با برآورد فرسایش سالانه‌ی خاک توسط مدل RUSLE نشان دادند که عامل توپوگرافی به‌عنوان موثرترین عامل در فرسایش خاک محسوب می‌شود (۱۳).

مهمترین ویژگی مدل فرسایشی WaTEM/SEDEM ضمن برطرف نمودن نقاط ضعف معادله‌ی جهانی فرسایش خاک، ارائه الگوهای فرسایش و رسوب می‌باشد که در مجموع تحت عنوان نقشه‌ی توزیع مکانی خاک[1] (شکل ۵) یا همان نقشه‌ی فرسایش-رسوب خاک نامیده می‌شود (۱۹). این مدل زمانی که فرایند شبیه‌سازی را انجام می‌دهد نتایج را در دامنه‌ی – تا + ارائه می‌دهد که اعداد منفی بیانگر فرسایش خاک و مقادیر مثبت بیانگر رسوبگذاری می‌باشد. همانگونه که نقشه‌ی توزیع مکانی فرسایش خاک (شکل ۵) نشان می‌دهد، این مدل از پیوستگی برخوردار است و در تمامی نقاط حوضه‌ی آبریز وضعیت رخدادهای فرسایشی و رسوبگذاری را محاسبه نموده و ارائه می‌دهد. این ویژگی مدل، ظرفیت قابل توجهی را در زمینه‌ی ارائه‌ی راهکارهای حفاظتی و کنترلی ایجاد نموده است. نقطه‌ی عطف مدل با پایه‌ی زمین‌نمای WaTEM/SEDEM این است که علاوه بر وضعیت فرسایش خاک، میزان رسوبگذاری و نیز چگونگی توزیع آن را در سطح حوضه ارائه می‌دهد. همچنین مقدار رسوبگذاری را به صورت تفکیک شده مشتمل

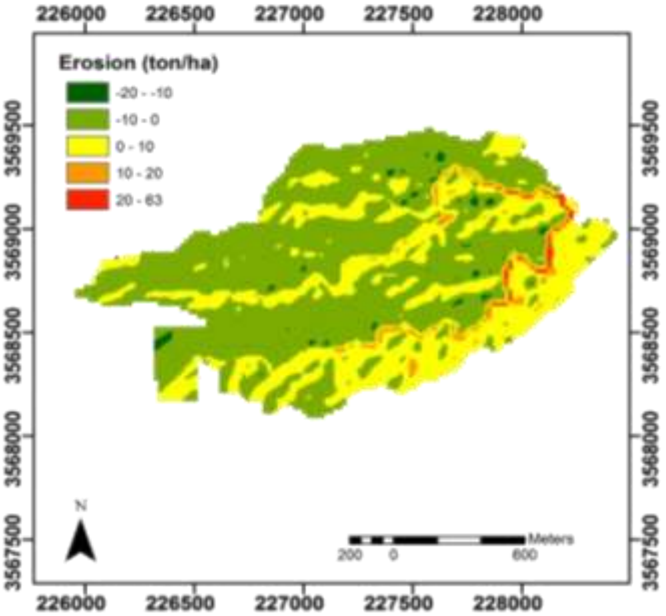
1- Soil distribution map (SDM)

بر کل رسوبات تولید شده[1]، کل رسوبات ته‌نشین شده[2]، کل رسوبات خروجی از حوضه[3]، کل رسوبات خروجی از رودخانه[4] و کل ته‌نشست برکه‌ای[5] محاسبه و برآورد می‌نماید. مدل WaTEM/SEDEM قادر به شبیه‌سازی مقدار فرسایش در منطقه بوده و توزیع مکانی فرسایش و نیز رسوب را در اختیار قرار می‌دهد و از این دیدگاه بر محدودیت RUSLE مبتنی بر عدم دسترسی به نقشه‌ی رسوب فائق آمده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین الگوریتم برآورد فرسایش در منطقه‌ی مورد مطالعه با تاکید بر فرسایش شیاری (Rill) و بین‌شیاری (Interrill)، الگوریتم نیرینگ بوده و همچنین می‌توان از الگوریتم گاورز نسبت به ردگیری فرسایش خندقی (Gully erosion) در حوضه‌ی مطالعاتی استفاده نمود (۱۸ و ۲۱). کل رسوبات ته‌نشست برکه‌ای در تمامی الگوریتم ها ۰ است. ویژگی این الگوریتم‌ها این است که در پایش فرسایش خاک، بر اساس نوع فرسایش‌هایی که برآورد می‌نمایند، قابل استفاده هستند. علیرغم دامنه‌ی محدود تغییرپذیری‌های شیب در منطقه‌ی مطالعاتی، عامل توپوگرافی به عنوان یکی از مهمترین عوامل موثر بر توزیع مکانی فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی می‌باشد؛ البته این مسئله به تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده در این بررسی مربوط می‌شود. انتخاب این دقت مکانی به دو عامل بستگی دارد در وهله اول لزوم استفاده از این دقت مکانی در مدل به علت محدودیت‌های توسعه دهنده‌ی مدل و از سوی دیگر تاکید پژوهشگرانی همچون ژانگ و همکاران (۲۹) بر این مسئله که برای برآورد شاخص توپوگرافی در مدل USLE بهترین دقت مکانی، ۵ متر می‌باشد. همانگونه که نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد با توجه به اینکه الگوریتم گاورز در برآوردهایی که انجام می‌دهد، فرسایش خندقی را نیز پایش می‌نماید، در نتیجه دارای بالاترین مقدار TSP یعنی کل رسوبات تولیدشده می‌باشد (۲۵۵/۳۹ تن در سال). بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی کل رسوبات تولیدی (۹۸/۳ تن در سال)، الگوریتم نیرینگ دارای بیشترین میزان انطباق در پیش‌بینی مقادیر رسوب حوضه‌ی مطالعاتی است (جدول ۲). همچنین در الگوریتم گاورز که فرسایش خندقی نیز لحاظ می‌گردد، مقدار TRE یعنی کل رسوبات خروجی از رودخانه دارای بیشترین مقدار در بین تمامی الگوریتم‌های ارزیابی شده است. آگاهی از وضعیت رسوبات تولیدی و در نهایت خروجی از یک حوضه، بهترین پارامتری است که جهت اتخاذ و اجرای شیوه‌های مدیریتی مناسب در حوضه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های توپوگرافیکی یک منطقه در تولید و انتقال رسوبات موثر است که در این ارتباط مدل WaTEM/SEDEM ابزاری کارآمد جهت برآورد اجزاء رسوب، می‌باشد. همانگونه که در شکل ۵ نیز بیان شده است نقشه‌ی توزیع مکانی فرسایش و رسوب در حوضه‌ی مطالعاتی بر پایه‌ی الگوریتم نیرینگ ارائه شد که دارای بیشترین انطباق با مقادیر اندازه‌گیری شده است. پس از الگوریتم نیرینگ، به‌ترتیب الگوریتم‌های مک‌کوول و ویشمایر–اسمیت دارای بیشترین همخوانی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رسوب در حوضه می‌باشند. کل رسوب تولیدی برآورد شده توسط الگوریتم نیرینگ برابر ۸۹/۵۰ تن در سال است که دارای اختلاف حدودا ۹ درصدی با مقدار اندازه‌گیری شده در سطح حوضه می‌باشد که موید کارایی این الگوریتم برای برآورد مقادیر رسوب است. ژیافام و همکاران در مقایسه‌ی الگوریتم نیرینگ یا به الگوریتم دیگر مدلسازی توپوگرافی بر مبنای مدل رقومی ارتفاع این الگوریتم را مناسب‌ترین الگوریتم برای برآورد عامل پستی و بلندی معرفی می‌کنند (۵).

با توجه به این نتایج از اعداد پیش‌بینی شده فرسایش توسط الگوریتم نیرینگ داده‌های مربوط به مقادیر واقعی فرسایش با داده‌های شبیه‌سازی شده برازش داده شده‌اند که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است. رابطه‌ای معنی‌دار در سطح یک درصد بین داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده شده است. این نتایج موید کارایی مدل WaTEM/SEDEM در برآورد فرسایش شیاری و بین‌شیاری در منطقه مورد مطالعه است و ابزاری مدیریتی محسوب می‌شود. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد الگوریتم گاورز بالاترین مقدار فرسایش و رسوب را برآورد نموده است. دلیل این موضوع در نظر گرفته شدن فرسایش خندقی در مقادیر برآورد شده است که البته با توجه به نوع اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و عدم تطابق آنها با فرسایش خندقی علت افتراق نتایج قابل توجیه است (جدول ۲). وضعیت حاکم بر حوزه‌ی مطالعاتی که بازتاب آن در نتایج شبیه‌سازی نیز مشهود است، موید این مطلب است که فرسایش‌های آبی غالب در منطقه، از نوع فرسایش‌های شیاری و بین‌شیاری هستند. همچنین وجود اختلاف در مبانی محاسباتی الگوریتم‌های LS و نیز نوع فرسایش‌هایی را که در برآوردهای خود لحاظ می‌نمایند در مقادیر فرسایش و باررسوب برآوردی تاثیرگذار است (۷).

همچنین با توجه به اندازه‌گیری مقادیر واقعی فرسایش در حوضه‌ی مطالعاتی، اعتبارسنجی مدل با بهره‌گیری از مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده صورت پذیرفت و نتایج حاکی از انطباق مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری شده می‌باشد (Pearson R-square: 0.612**) (شکل ۶).

1- Total sediment production (TSP)
2- Total sediment deposition (TSD)
3- Total sediment export (TSE)
4- Total river export (TRE)
5- Total pond deposition (TPD)



شکل ۵- نقشه‌ی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب شبیه سازی شده توسط مدل (الگوریتم نیرینگ)

Figure 5- The map of spatial distribution of soil loss and deposition using WaTEM/SEDEM (Nearing algorithm)

جدول ۲- اجزاء مختلف رسوبات برآورد شده (تن بر سال) بر اساس الگوریتم های مختلف شیب توسط مدل

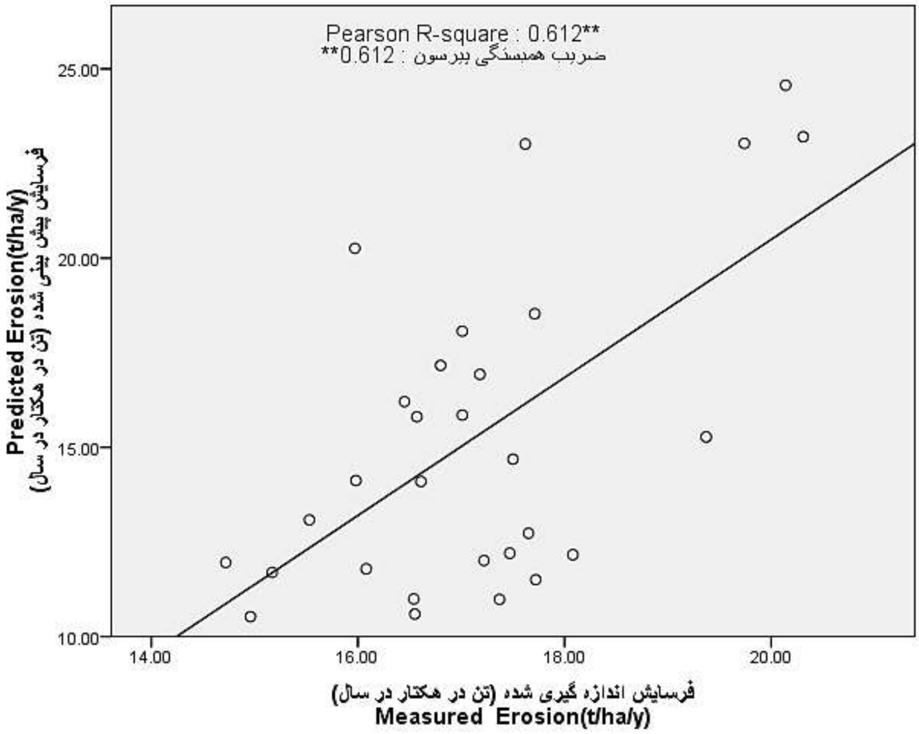
Table 2- Estimated sediment components (ton/y) using different LS algorithms with model

اجزاء رسوب Deposition components	الگوریتم‌های مختلف LS در مدل WaTEM/SEDEM Different LS algorithms in WaTEM/SEDEM model				
	گاورز (۱۹۹۱) Govers (1991)	مک‌کوول (۱۹۸۹) McCool (1989)	نیرینگ (۱۹۹۷) Nearing (1997)	ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) Wischmeier-Smith (1978)	اندازه‌گیری شده Measured
کل رسوبات تولیدی TSP	255.39	42.75	89.50	38.83	98.3
کل رسوبات ته‌نشست شده TSD	43.86	7.17	12.36	7.66	13.60
کل رسوبات خروجی حوضه TSE	175.28	29.37	50.74	24.70	52.36
کل رسوبات خروجی رودخانه TRE	36.25	6.21	26.40	6.47	32.34

TSP: Total sediment production, TSD: Total sediment deposition, TSE: Total sediment export, TRE: Total river export

نتیجه‌گیری

بهترین الگوریتم شبیه‌ساز عامل توپوگرافی برای منطقه‌ی مورد مطالعه بر مبنای برآورد فرسایش‌های ورقه‌ای، شیاری و بین‌شیاری، الگوریتم LS نیرینگ است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد الگوریتم گاورز بالاترین مقدار فرسایش و رسوب را برآورد نموده است که علت این امر لحاظ نمودن فرسایش خندقی در مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم محاسباتی گاورز است. نتایج حاصل از مقایسه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری شده در حوضه با مقادیر پیش‌بینی شده برای مدل WaTEM/SEDEM نیز نشان داد که ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل WaTEM/SEDEM برابر ۰/۶۱۲(معنی‌دار در سطح یک درصد) می‌باشد که حاکی از انطباق با مقادیر واقعی است. مناطقی که در آنها عملیات کشت صورت گرفته مناطقی مسطح شده که آسیب‌پذیرند و در صورت عدم اجرای مدیریت پایدار در این اراضی و کنترل فرسایش، میزان رسوبات برای آنها خطرساز هست. مناطق خطر رسوبگذاری به ناحیه‌ی مخزن محدود نمی‌شود که در معرض انباشت بیش از حد هستند، بلکه مسیرهای آبراهه‌ها و شبکه رودخانه‌ای بویژه در فصول بارانی که رسوبات در آن زیاد می‌شود (۱۳ و ۱۶) در معرض خطر هستند.



شکل ۶- اسکترپلات کالیبراسیون مدل WaTEM/SEDEM بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده
Figure 6- Scatter plot of WaTEM/SEDEM calibration based on measured data

پوشش گیاهی ضعیف، کشت مداوم و سوزاندن بقایای گیاهی در مناطق تحت کشت منجر به وقوع فرسایش‌های شدیدی شده است که حاکی از تاثیرات توامان کاربری اراضی و توپوگرافی می‌باشد (۵). همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده در حوضه‌ی مطالعاتی نشان داد که میانگین نسبت تحویل رسوب که شاخصی از میزان انتقال رسوبات درون حوضه‌ای می‌باشد برابر ۰/۴ است و ضرورت دارد تا با بکارگیری شیوه‌های مدیریتی مناسب میزان انتقال رسوبات را به حداقل ممکن رساند. وضعیت توپوگرافی (شیب‌دار بودن)، وجود درصد بالای سیلت در خاک‌های منطقه، عدم پایداری خاکدانه‌ها در مقابل تنش‌های آبی و فرسایشی و همچنین درصد ناچیز پوشش گیاهی از عوامل اصلی میزان فرسایش زیاد در منطقه می‌باشد. استفاده از مدل WaTEM/SEDEM به‌عنوان یک ابزار کارآمد جهت برآورد فرسایش آبی و بالاخص رسوب در سطح حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود و با توجه به اینکه جزء مدل‌های با پایه‌ی زمین‌نما است در نتیجه عامل توپوگرافی را به دقت در فرایند شبیه‌سازی و برآورد توزیع مکانی رسوب لحاظ می‌نماید. همچنین با توجه به اینکه ورودی‌های مدل به صورت نقشه‌های زمین مرجع شده است، در نتیجه توزیع مکانی رسوب را به دقت نمایش می‌دهد و می‌تواند جهت شناسایی دقیق کانون‌های بحرانی تولید فرسایش و رسوب استفاده شود. در صورت تهیه‌ی بانک‌های اطلاعاتی می‌توان از این مدل برای تحقق اهداف مدیریت پایدار در حوضه‌ها استفاده نمود.

سپاسگزاری

در این قسمت جا دارد که از همکاری‌ها و مساعدت‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خوزستان بطور خاص آقای مهندس رعیت پیشه و کارشناسان و پرسنل حوضه‌ی معرف و زوجی شوش نهایت تشکر و قدردانی را بعمل آوریم.

منابع

1- Alatorre L.C, Begueria S., Garcia-Ruiz J.M. 2010. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: a case

study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WaTEM/SEDEM. Journal of Hydrology 391:111–125.
2- Amsalu T., and Mengaw A. 2014.GIS based soil loss estimation using RUSLE model: The case of Jabi Tenan Woreda, ANRS, Ethiopia, Natural Resource 616-625.
3- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal 56: 464-465.
4- Cobo J.G., Dercon G., Cadisch G. 2010. Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. Agr Ecosystem Environment 136:1-15.
5- Elizeu J.D., Paolo Gomes Minella J., Evrard O. 2017. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil., Soil and Tillage Research 174: 24–33.
6- Fu G.B., Chen S.L., and McCool D.K. 2006. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. Soil and Tillage Research 85: 38-49.
7- Gia Pham T., Degener J., and Kappas M. 2018. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. International Soil and Water Conservation Research 6: 99–110.
8- Govers G. 1991. Time-dependency of runoff velocity and erosion: the effect of the initial soil moisture profile. Earth surface processes and Landforms 16: 713-729.
9- Liu Y., and Fu B. 2016. Assessing Sedimentological Connectivity Using WaTEM/SEDEM Model in A Hilly And Gully Watershed of The Loess Plateau, China. Ecological Indicators 66: 259-268.
10- McCool DK., Foster G.R., Mutchler C.K., and Meyer L.D. 1989b. Revised Slope Length factor in the Universal Soil Loss Equation. T. Am. Soc. Agr. Eng. 32: 1571–1576.
11- Nearing M.A., Nicks A.D. 1998. Evaluation of the Water Erosion Prediction Project model for hillslopes. In: Boardman J, Favis-Mortlock D (eds) Modelling soil erosion by water. Springer, Oxford, pp43-53.
12- Paul L., and Vlek G. 2011. Modeling soil erosion and reservoir sedimentation at hillslope and catchment scale in semi-arid Burkina Faso., Ecology and Development Series No. 80, 2011.
13- Renard K.G., Foster G.R., Weeies G.A., McCool D.K., and Yoder D.C. 1997. Predicting soil erosion by water; A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
14- Rezaei P., Faridi P., Ghorbani M., and Kazemi M. 2014. Estimation of soil erosion using RUSLE model and recongnizing of most effective factor in Gabric watershed-Southeast of Hormozgan Provine. Researches of Qualitative Geomorphology 3(1): 97-113.
15- Ro¨mkens M.J.M., Young R.A., Poesen J.W.A., McCool D.K., El-Swaify S.A., and Bradford J.M. 1997. Chapter 3. Soil erodibility factor (K). In K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder (eds.) Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No 703. (Washington, DC: US Department of Agriculture), pp. 65_99.
16- Shi Z.H., Ai L., Fang N.F., and Zhu H.D. 2012. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China., Journal of Hydrology 438–439: 156–167.
17- Shirazi M.A., and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture, Soil Science Society of America Journal 48: 142-147.
18- Van Oost K., Govers G., and Desmet P. 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage .Landscape Ecology 15: 577–589.
19- Van Oost K. 2003. Spatial modelling of soil redistribution processes in agricultural landscapes. K.U.Leuven, Belgium.
20- Van Oost K., Govers G., Cerdan O., Van Rompaey D.A., Steegen A., Nachtergaele J., Takken I., and Poesen I. 2005. Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. Catena 61: 105–12.
21- Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., and Poesen J. 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. Earth Surf Process Landf 26:1221–1236. doi:10. 1002/esp.275
22- Van Rompaey A.J.J., Govers G., and Puttemans C. 2002. Modelling land use changes and their impact on soil erosion and sediment supply to rivers. Earth Surf Process Landf 27:481–494. doi:10.1002/esp.335
23- Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J., and Govers G. 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modeling. Soil Use Manage 19: 386–394.
24- Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., and Poesen J. 2001. Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach. Surf. Process. Landf. 26: 1221–1236.
25- Van Rompaey A.J.J., and Govers G. 2002. Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction. International Journal Geography Inf. Science 16: 663–680.
26- Wilson J.P., and Gallant J.C. 2000. Digital terrain analysis. In Wilson, JP and Gallant JC. (Eds). Terrain analysis: principles and applications. John Wiley & Sons, New York, PP: 1-22.

27- Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. Predicting. Washington D.C. 58 pp. Rainfall Erosion Losses. Agricultural Handbook No. 537. USDA-Science and Education Administration.
28- Yitayew M., Pokrzywka S.J., and Renard K.G. 1999. Using GIS for facilitating erosion estimation. Applied Engineering in Agriculture 15: 295-301.
29- Zhang H.,YangQ., Li R., Liu Q., Moore D., He P., and Geissen V. 2013 .Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. Journal of Computers and Geosciences 52: 177–188.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 67-82

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۸۲-۶۷

Mapping of Water Erosion and Deposition Affected by Different LS Algorithms Using WaTEM/SEDEM Model

H. Neisi[1]- A. Khademalrasoul[2*]- H. Amerikhah[3]
Received: 20-01-2020
Accepted: 07-12-2020

Introduction: Soil erosion is one of the most important forms of soil degradation which topographical characteristics are effective on its occurrence and spatial distribution. Actually, soil erosion is one form of soil degradation that includes on-site and off-site effects and the off-site effect is deposition and sedimentation. In recent decades, the potential of soil erosion has been recognized as a serious threat against soil sustainability. Topographical attributes such as slope gradient (S) and slope length (L) are considered as the most important land surface properties which control energy fluxes, overland and intra-soil transport of water and sediment, and vegetation cover distribution within a landscape. The L and S are two main factors in the USLE equation which are meaningfully effective on soil erosion. The development of modern techniques such as geomorphometry has made it possible to quantify these attributes in GIS environments. Geomorphometry or terrain analysis is a computer technology-based science in which morphometric and hydrological attributes are calculated by a series of mathematical algorithms from a digital elevation model (DEM). WaTEM/SEDEM is water and tillage erosion model/sedimentation which is possible to estimate water erosion and also different forms of sediments in the watershed and hydrographical network. The accuracy of DEM in this model is really important and effective on the quality of model outputs.

Material and Methods: Landscape planning tools might help simplify the complexity of soil erosional processes. Furthermore, using predictive tools open up for the possibilities to investigate the effectiveness of different management scenarios on soil erosional responses to make a decision for improving soil properties by application of BMPs. Soil erosion modelling as a landscape planning tool is an efficient way to investigate the on-site and off-site effects of erosion. At the same time this tool opens up for an opportunity to perform scenario analysis with the respect to the placement of structural BMPs such as buffer zones. The soil erosion model WaTEM has been used as a landscape planning tool. WaTEM is a spatially distributed empirical model to simulate both erosion and deposition by water explicitly in a two dimensional landscape. This soil erosion model has been used as a landscape planning tool. The Universal Soil Loss Equation (USLE) has been developed to predict sheet and rill erosion. Desmet and Govers (1996) showed that using the 2D-calculation of the LS-factor in WaTEM made it possible to predict rill, interrill, and ephemeral gully erosions. In this study the spatial distribution of soil erosion and deposition affected by different LS-factors were investigated using WaTEM/SEDEM model that including rainfall erosivity (R-factor), soil erodibility (K-factor), topography (LS-factor), crop cover (C-factor) and management (P-factor) as GIS layers (.rst format) in Zoji watershed located in Shush (Khuzestan province). The WaTEM/SEDEM includs three main input parts, the first part consist of DEM, parcel map and stream network. The second part is CP factor and the third part consist of LS algorithms. The variations of LS algorithms are a milestone of this model and provide the possibility to define different LS situations in the watershed. In order to evaluate the effectiveness of LS algorithms, in the simulation process Govers, McCool, Nearing and Wishmeier-Smith algorithms were defined for WaTEM/SEDEM model.

Results and Discussion: Results of correlation (R=0.78) showed that topography had the highest effect on soil erosion distribution. Also our results illustrated that the amount of deposition in forms of total sediment production (TSP), total sediment deposition (TSD) and total sediment export (TSE) between different LS algorithms were disparate. Based on prediction of rill and interrill erosion, Nearing algorithm was the best LS algorithm and Govers algorithm was convenient in order to monitor and evaluate gully erosion. This study results showed that Govers algorithm estimated the highest amount of TSP because the Govers algorithm basically estimate the sheet, rill, interrill and gully erosion, therefore the amount of sediment in this algorithms is the highest one. For Govers algorithm the estimated TRE was the highest because the Gully erosion also was in the calculations and mostly the volume discharge originated from Gully was significantly higher than sheet and rill erosion. Therefore, regarding the types of prevailing erosion in each case the type of selected LS algorithm to

1, 2 and 3- Former M.Sc. Student, Assistant Professor and Scientific Member, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email :a.khademalrasoul@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2020.14940.0

simulate soil erosion and deposition distribution should be different.

Conclusion: In general, WaTEM/SEDEM and its LS algorithms is a suitable tool to select and apply best management practices (BMPs) to control soil erosion at critical areas and hotspots. Our results confirmed that regarding the selection of each LS algorithm, the amount of sediment components and their distribution could be different.

Keywords: Best management practices (BMPs), Rill and interrill erosion, Simulation, Specific surface area of watershed, Topography factor